引用格式：王凡, 周慧, 汪嘉宁, 等. 印太交汇区海洋环流与气候观测国际计划回顾与展望. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 939-953.
Wang F, Zhou H, Wang J N, et al. Review and prospect on international ocean circulation and climate observation projects in the Indo-Pacific convergence region. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(7): 939-953. (in Chinese)

印太交汇区海洋环流与气候观测国际计划回顾与展望

王 凡[1,2*]　周 慧[1,2]　汪嘉宁[1,2]　王 琳[1]　马一心[1]

1 中国科学院海洋研究所 青岛 266071
2 中国科学院大学 海洋学院 北京 100049

摘要　目前，人类社会面临全球变暖及由此引发的一系列严峻挑战。海洋作为维持地球生命系统的一个重要组成部分，在实现人类社会可持续发展目标中起着关键作用。印太交汇区作为地球气候系统中的热动力引擎所在地，其海洋状态及其变异在调节全球热量分配和气候变化中起着举足轻重的作用，是国际海洋观测计划的重点区域。文章通过回顾20世纪以来在印太交汇区开展的海洋环流与气候观测方面的国际计划，梳理该区域已取得的成果和面临的挑战。通过文献调研分析，进一步量化我国自“十二五”以来通过实施海洋强国战略，印太交汇区海洋环流与气候观测国际合作取得的长足发展，以及由此推动的我国在该领域的国际引领地位和丰硕的科研产出。结合近10年我国在印太交汇区海洋环流与气候观测国际合作及科考调查取得的经验与问题分析，提出了未来在该区域加强深海观测，开展多圈层、多学科领域交叉合作的国际观测计划框架，突出顶层设计和中国在其中的引领作用的建议，为我国乃至全球应对气候变化、实现可持续发展提供有力保障。

关键词　印太交汇区，海洋观测，国际计划，全球变暖，多圈层协调观测系统，深海调查，多学科交叉

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20220602002

印太交汇区主要包括西太平洋和东印度洋及其共同毗邻的东南亚海域。这里是全球陆源物质向海输送中心及海洋生物多样性中心，也是“21世纪海上丝绸之路”的核心区域。作为地球气候系统中的热动力引擎——印太暖池所在地，印太交汇区海洋的状态及其变异在调节全球热量分配和气候变化中起着举足轻重的作用[1-4]。特别是近几十年，在全球变暖的大背景下，印太交汇区是全球海平面上升速率最高的区域[5]，印太暖池也在持续扩张并增暖[6-8]。这些变化对该区域海洋生态系统及生物多样性产生较大威胁，并显著改变该区域乃至全球降水分布，对局地及全球的天气和气候系统产生巨大影响。开展该区域的海洋环流与气

*通信作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（B类）（XDB42000000），国家自然科学基金（42090040、41730534、41876009）
修改稿收到日期：2022年7月3日

候观测对于了解气候变化的关键动力过程及其对人类社会和地球生态系统的影响，以及实现对气候变化的精准预测都具有重要作用，因此印太交汇区是国际海洋观测计划的重点区域。

1 20世纪印太交汇区海洋观测国际计划

在 20 世纪初，海洋观测主要侧重于收集和描述海洋的物理、化学和生物状态等信息，以欧美发达国家开展的单边海洋科考为主。到了 20 世纪 60 年代，海洋数值模拟和预测方法随着第三代电子计算机的发展也开始广泛应用。模式模拟和预报精度对海洋初始场的依赖性进一步推动了海洋观测向全球化和长时序监测方向发展，从而催生了“全球大气研究计划”（GARP）。随后，以物理气候系统为主要研究对象的“世界气候研究计划”（WCRP）开始实施，印太交汇区海洋观测国际合作在该计划的推动下蓬勃发展，特别是 20 世纪 80—90 年代针对厄尔尼诺/南方涛动（ENSO）的监测和模拟预测，陆续实施了“热带海洋与全球大气”（TOGA）、“世界大洋环流实验”（WOCE）和“气候变率及其可预报性”（CLIVAR）等核心计划，初步构建了印太交汇区海洋综合观测系统。

由于海洋观测是耗资比较巨大的科学试验，维持其规模性、持续性开展需要政府和机构投入大量资金。受印太交汇区周边国家经济社会发展水平影响，该区域的海洋观测国际计划发展在 20 世纪具有显著的不均匀性和不同步特征，缺乏以印太交汇区为核心的国际观测计划。总体上来说，西太平洋海域相对起步较早，观测规模较大。东印度洋观测主要始于 1957 年开始的“国际印度洋科学考察”（IIOE），之后 1977 年开展的 GARP 计划下的“季风实验”（MONEX）主要是沿印度半岛周边开展了观测调查，1995—1997 年在西印度洋开展了“印度洋实验”（INDOEX）。此外，TOGA 期间东印度洋观测主要是一些商船搭载的投弃式温度剖面（XBT）测量和验潮站观测，WOCE 期间在东印度洋布设了几条经向断面观测。相比之下，印太交汇区海洋观测国际合作相对滞后，缺乏大型的多边国际合作计划。

1.1 “黑潮及其邻近海域合作研究”

印太交汇区周边海域最早的大规模海洋环流方面的国际观测计划是 1965—1979 年开展的“黑潮及其邻近海域合作研究”（CSK），其调查海域涵盖西北太平洋中、低纬度区域[9]（图 1）。该计划是由联合国教科文组织政府间海洋学委员会（UNESCO-IOC）和联合国粮食及农业组织（FAO）印太海洋渔业协会共同组织，日本主导实施，包括美国、苏联、菲律宾、韩国及中国台湾等 11 个国家和地区参与。CSK 计划的实施显著提升了西太平洋物理海洋学和渔业资源方面的认知，并开启了纵跨 1ºS—34ºN 西太平洋 137ºE 断面的水文观测。目前，该断面由日本气象厅维护，已经累积了 55 年的宝贵数据，为认知西太平洋主要海洋环流结构和长期变异提供了重要观测基础。时隔 40 年后，CSK 第二个阶段的国际合作计划于 2021 年开启，旨在利用新的观测技术和方法，开展黑潮及周边海域的物理、气象和生物地球化学的综合调查，构建黑潮流域周边国家特别是经济专属区的数据共享平台[10]。

1.2 “热带海洋与全球大气”-“世界大洋环流实验”时期

20 世纪 80 年代，国际科学联合会理事会（ICSU）、国际社会科学联合会（ISSC）、世界气象组织（WMO）、联合国环境规划署（UNEP）、UNESCO 等机构发起了全球变化研究计划。该计划由 WCRP、“国际地圈-生物圈计划”（IGBP）、“全球环境变化的人类因素计划”（HDP）和“国际生物多样性计划”（DIVERSITAS）组成，是一个高度综合的多学科框架体系。在此计划的推动下，印太交汇区海洋观测国际合作在 20 世纪 80—90 年代末陆续实施了 WCRP 下的 TOGA、WOCE 和 CLIVAR 等核心计划。

TOGA 是一个海洋与大气学科的联合调查计划，旨在通过在热带海域构建定点长时序潜标和浮标观测阵列并结合关键断面调查监测热带海洋状态的变化（图 2），以解决大气风应力变化和其他强迫对赤道海流和热力结构的影响及热带海洋动力学对全球大气环流的反馈（也就是海洋大气耦合过程与机制）；从而厘清热带海洋变化对全球气候（特别是 ENSO 的发展、消亡）的影响机理及其可预报性机制，提高中、长期天气预报的准确性，为发展业务预报系统提供科学背景。该计划于 1985 年开始实施，历时 10 年，共有美国、日本、中国、法国、澳大利亚和新西兰等 18 个国家参加。

TOGA 实施的前 5 年，主要建立了一个热带太平洋观测系统和地面及高空观测站，填补了当时世界天气监测网空隙。通过这些观测系统实现了利用统计预报技术和海气耦合系统简单动力模式进行季节或更长时间尺度上 ENSO 循环中主要震荡的经验预报[11]。在 TOGA 实施的后 5 年提出了“耦合海洋大气响应试验”（COARE）子计划，旨在利用陆地天气站、锚系浮标、天气气球和气象卫星观测结合，对西太平洋暖池区进行广泛、精密的观测，特别是海洋

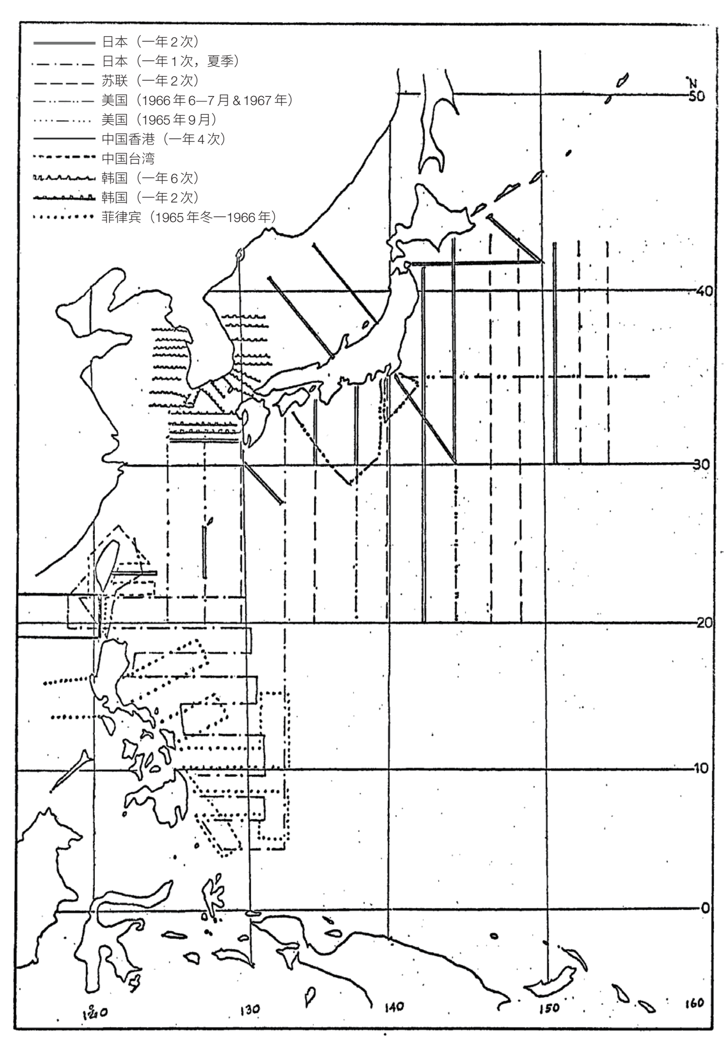


图 1 “黑潮及其邻近海域合作研究”（1965—1979 年）观测断面分布图

Figure 1 Map of oceanographic stations during Cooperative Study of Kuroshio and Adjacent Regions (CSK)

修改自：http://iocwestpac.org/page/670.html

Adapted from http://iocwestpac.org/page/670.html

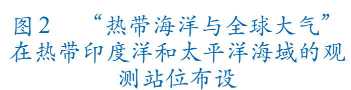
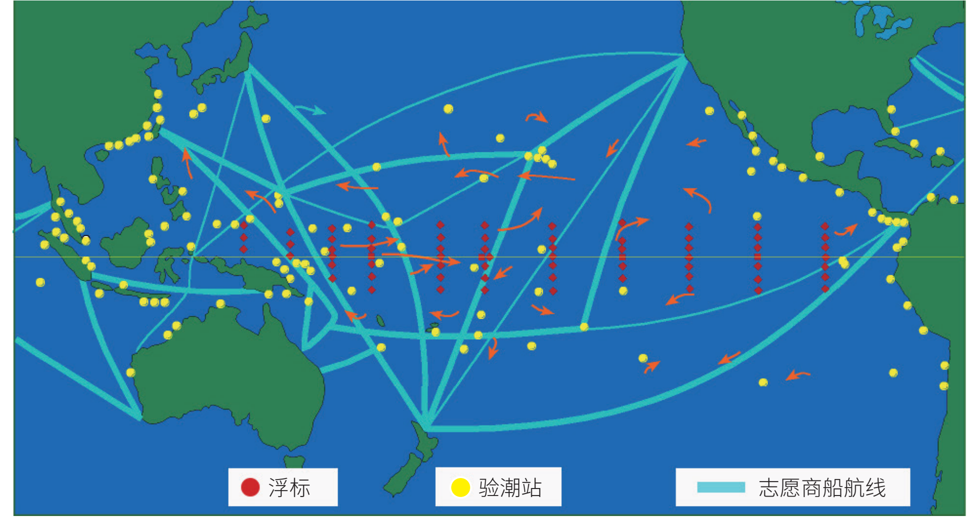


图 2 “热带海洋与全球大气”在热带印度洋和太平洋海域的观测站位布设

Figure 2 Map of oceanographic stations in tropical Pacific Ocean and Indian Ocean during Tropical Ocean-Global Atmosphere (TOGA) project

修改自：https://www.pmel.noaa.gov/pubs/outstand/mcph1720/images/fig03.gif

Adapted from https://www.pmel.noaa.gov/pubs/outstand/mcph1720/images/fig03.gif



与大气之间的能量交换，从而更精确量化海气耦合过程。中国科学院的“科学一号”“实验三号”及原国家海洋局的“向阳红五号”科学考察船参与了TOGA-COARE的西太平洋科考调查[12]。

WOCE于1990年开始实施，至2002年结束；该计划旨在为发展气候变化预测模式收集验证模式所需的资料，确定对海洋长期变化有代表性的WOCE特定数据集，获取全球海洋从海表到海底全水层的物理、化学和生物数据，研究大洋环流长期变化的测量方法（图3）。WOCE共有包括中国在内的近30个国家参与，前所未有地获取了1990—1998年全球海洋大量的现场观测数据。这些数据为理解全球海洋的重要物理过程及发展具有涡旋分辨能力的全球海洋环流模式奠定了重要观测基础。2007年，CLIVAR和“国际海洋碳协调计划”（IOCCP）共同成立了“全球海洋船载水文调查计划”（GO-SHIP）委员会，对WOCE断面进行重新观测和布局，但GO-SHIP计划的断面在印太交汇区非常稀少。

1.3 第一次“国际印度洋科学考察”

东印度洋作为印太交汇区的毗邻海域，其海洋观测国际计划开始于1957年的第一次“国际印度洋科学考察”（IIOE）[13]。该计划属于ICSU在1957—1958年发起的国际地球物理年计划的一个重要组成部分，由UNESCO-IOC组织实施，于1965年完成。该计划由23个国家参与，在东印度洋、西印度洋和北印度洋开展了站位覆盖面广、密度非常高的综合观测（图4）[14]。IIOE计划的主要目标是解决印度洋的渔业资源问题和印度洋海洋环流特别是东印度洋上升流等过程对季风的影响，并关注海洋对人类活动废弃物的容纳上限。IIOE计划在包括物理海洋、海洋气象等多个学科获得了丰硕的成果，特别是对赤道印度洋海洋环流的认知[15]。UNESCO-IOC于2015年实施了第二个阶段的IIOE计划（IIOE-2）。

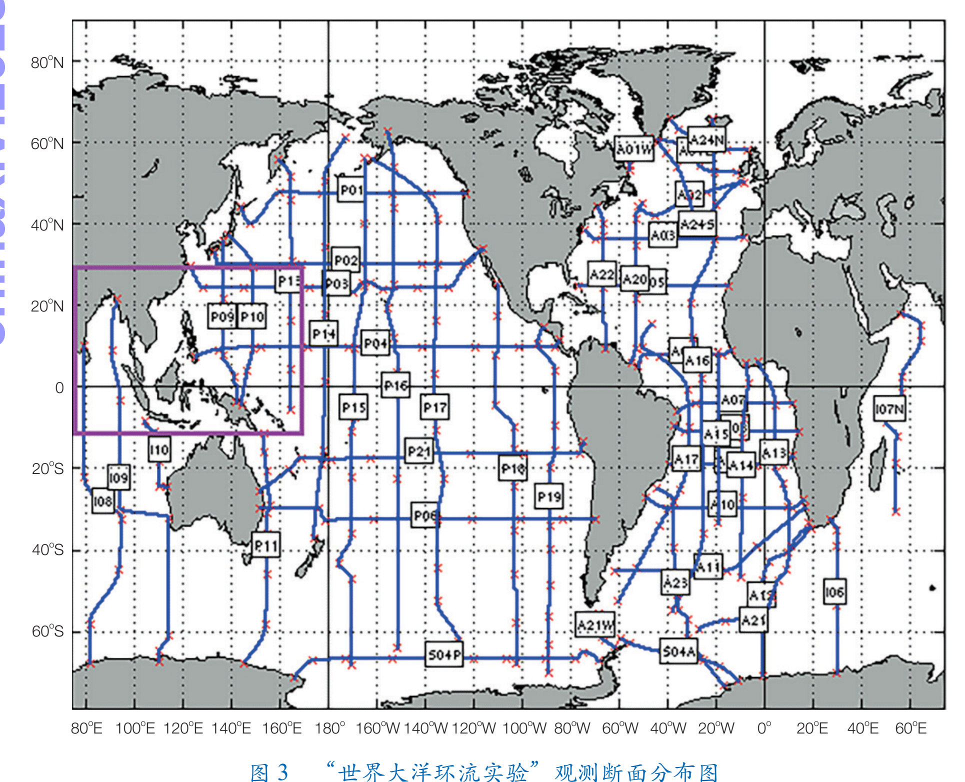


图3 “世界大洋环流实验”观测断面分布图

Figure 3 Map of oceanographic stations during World Ocean Circulation Experiment (WOCE)

紫色框为印太交汇区；修改自：https://polar.ncep.noaa.gov/global/woce/woce_trackmap.png

Purple rectangle marks the Indo-Pacific Convergence Region; adapted from https://polar.ncep.noaa.gov/global/woce/woce_trackmap.png

1.4 “印度尼西亚贯穿流观测”

相比于热带西太平洋和东印度洋，印太交汇区核心海域的大规模海洋观测国际计划起步较晚，规模相对较小。早期主要关注的是印度尼西亚贯穿流（以下简称“印尼贯穿流”或ITF），且多是双边合作。在1993年，美国与印度尼西亚科学家开展了针对ITF发源地、主要路径、流量等方面的观测研究，即“印尼贯穿流观测”（Arlindo）（图5）[16]。该计划主要科学目标是厘清印度尼西亚海（以下简称“印尼海”）中的环流结构和水团层结，进而全面了解ITF的发源地、运移路径、印太洋际间水交换及主要的混合过程。

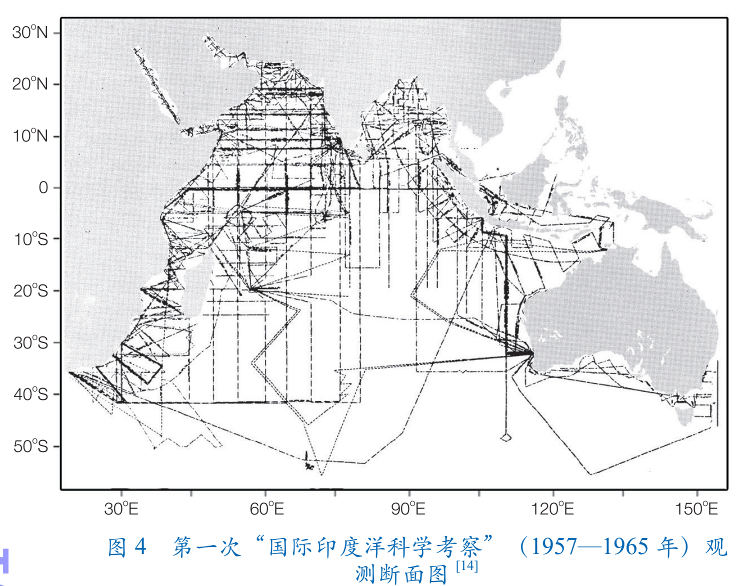


图 4　第一次“国际印度洋科学考察”（1957—1965 年）观测断面图[14]

Figure 4　Map of oceanographic stations during International Indian Ocean Expedition (IIOE; 1957–1965)[14]

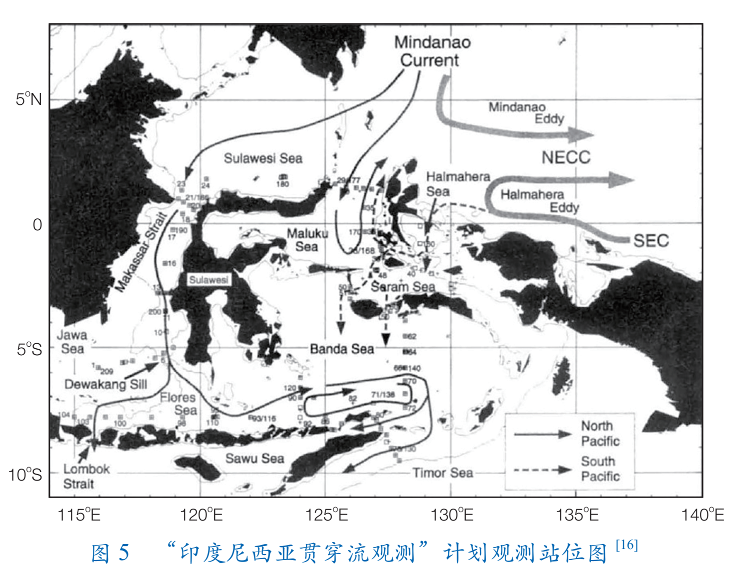


图 5　“印度尼西亚贯穿流观测”计划观测站位图[16]

Figure 5　Map of oceanographic stations where measurements were obtained by Arlindo programme[16]

2 21世纪以来印太交汇区海洋观测国际计划及其现状

进入 21 世纪后，随着诸多国家对改进气候变化预测、管理海洋资源以减轻自然灾害影响，以及更有效地利用沿海资源的需求日益增长，各种海洋观测技术与方法不断发展、更新。海洋卫星、漂流和剖面浮标，以及船载观测等技术手段的应用越来越广泛，科学界开始将一些观测平台转变为支持研究需求的可持续全球系统的组成部分。在 30 多个国家和国际组织的共同努力下，“全球实时地转海洋学观测阵”（Argo）计划于 2000 年开始实施。该计划通过在全球无冰海域维持 3 000 个带卫星定位通讯系统的自动探测浮标（Argo 剖面浮标），收集从海表到 2 000 m 水层的海水温度和盐度数据，组成全球 Argo 海洋观测网，为认识和研究海洋内部状态及其变异提供了全球准同步观测数据[17,18]。

为了尽可能多获取观测数据，Argo 浮标在布放时通常会避开西边界流区或靠近陆地边界海域，以免浮标搁浅。同时，受海流的影响，全球海洋中 Argo 浮标的分布很不均匀。特别是在印太交汇区，由于西边界流和印度尼西亚海域复杂岛屿地形影响，该区域的 Argo 剖面浮标明显偏少（图 6）。因此，传统海洋观测仍是目前印太交汇区海洋观测资料获取的重要手段。

自 2006 年开始，我国先后主导开展了“南海—印尼海输运/交换”（SITE）、“印尼贯穿流输运、内波与混合及其对季节性鱼群迁徙影响”（TIMIT）等项目；在印尼海的北部和西部通道，如卡里马塔海峡、巽他海峡、龙目海峡和望加锡海峡开展了联合观测调查[19]。

2.1 “西南太平洋海洋环流与气候试验”和“西北太平洋海洋环流与气候试验”

作为 TOGA 和 WOCE 的后续计划，CLIVAR 在 2000 年后陆续实施了“西南太平洋海洋环流与气候试验”（SPICE）和“西北太平洋海洋环流与气候试验”（NPOCE）计划（图 7）。SPICE 计划于 2008 年开始实施，经过短期过程研究和 7 年多的现场海洋观测和模式模拟，精细描述了西南太平洋特别是所罗门海、东澳大利亚海域海洋环流系统的各分支及其变化

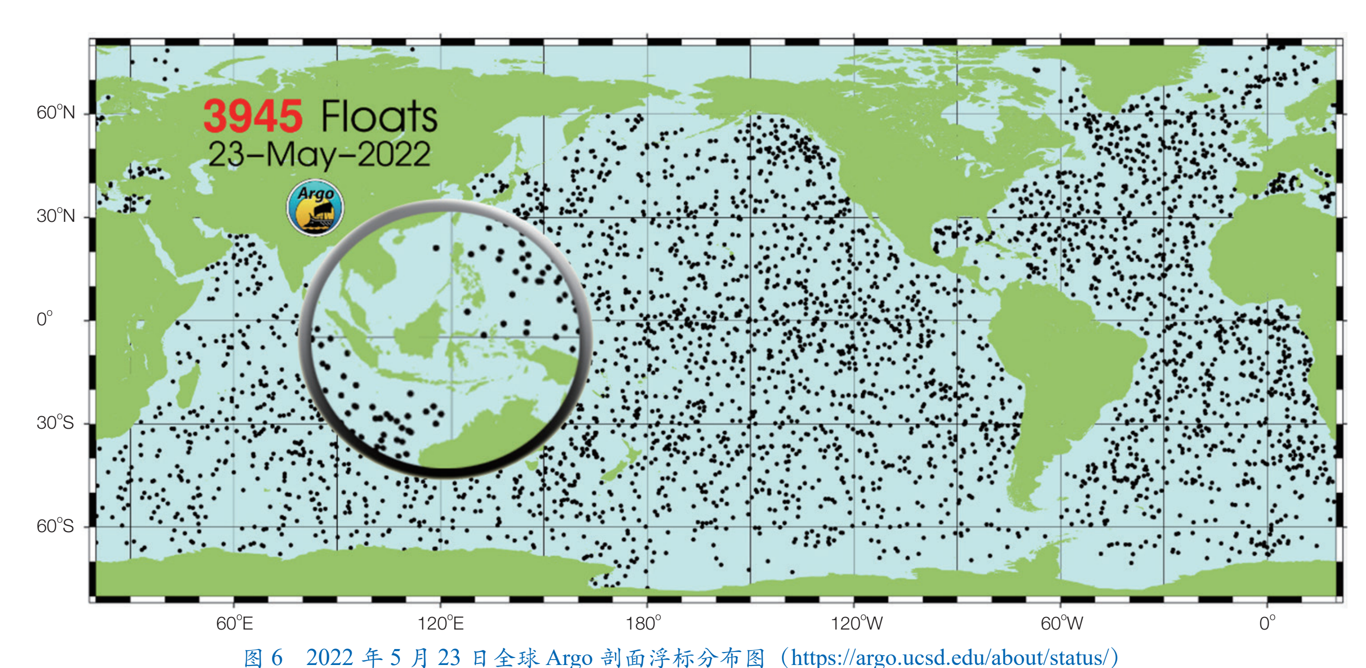


图 6 2022 年 5 月 23 日全球 Argo 剖面浮标分布图（https://argo.ucsd.edu/about/status/）
Figure 6 Map of Argo stations on May 23, 2022（https://argo.ucsd.edu/about/status/）

规律和联系[20-22]。

NPOCE 计划于 2010 年启动，由中国科学院院士胡敦欣领衔发起，这是我国发起的第一个海洋领域大型国际合作计划，共有 8 个国家的 19 个研究机构参与。NPOCE 旨在观测、模拟和理解西北太平洋海洋环流的变异规律及其动力机制，以及在全球和区域性气候变化中的作用[23]。在国家自然科学基金项目、科学技术部国家重点基础研究发展计划项目和中国科学院战略性先导科技专项等的大力支持下，中国在西太平洋和印尼海域建立了大规模潜标/浮标观测网，有力推动了西边界环流动力学、西太暖池变异及 ENSO 多样性特征与机理、印太水交换和多尺度相互作用等方面的研究[3,24-36]，奠定了我国在西太平洋环流动力学及其气候效应研究领域的引领地位，极大提升了我国在该领域的国际影响力。

2.2 “热带太平洋观测系统2020”

21 世纪以来，随着 ENSO 多样性发展和全球变暖持续影响，ENSO 的模拟和预测也遭受了巨大挑战。同时，TOGA-COARE 构建的热带太平洋国际观测系统因缺乏持续的经费支持，2012—2014 年逐步缩减。特别是国际主流气候模式对 2014/2015 年超强厄尔尼诺事件预测失败，向气候模式和热带太平洋国际观测网络提出了新的挑战。在此背景下，“热带太平洋观测系统 2020”（TPOS 2020）计划于 2014 年开始实施，包括中国、美国、日本等 12 个国家参与该计划（图 8）。TPOS 2020 旨在 2020 年完成一套更加优化的热带太平洋国际观测系统，以提升耦合天气预报和季节内预测水平，增进对 ENSO 的认知和模拟预测，从而提升极端天气系统对洪水、渔业、山火和空气污染等领域的预警能力。TPOS 2020 将强化对上层海洋及海面大气重要参数和现象的监测，增加海洋生物地球化学方面的内容，并将其观测网络向太平洋东、西边界区域和高纬度区域扩展。

2.3 “印度洋海洋观测系统”

“印度洋海洋观测系统”（IndOOS）的科学目标主要是为天气与气候预报、环境评估与决策提供可持续的高质量海洋与大气观测数据[37]。该计划自 1999 年开始论证，于 2006 年在 CLIVAR 和“全球海洋观测系统”（GOOS）框架下开始实施。IndOOS 在印度洋构建了“热带潜标阵列”（RAMA），该阵列观测对提

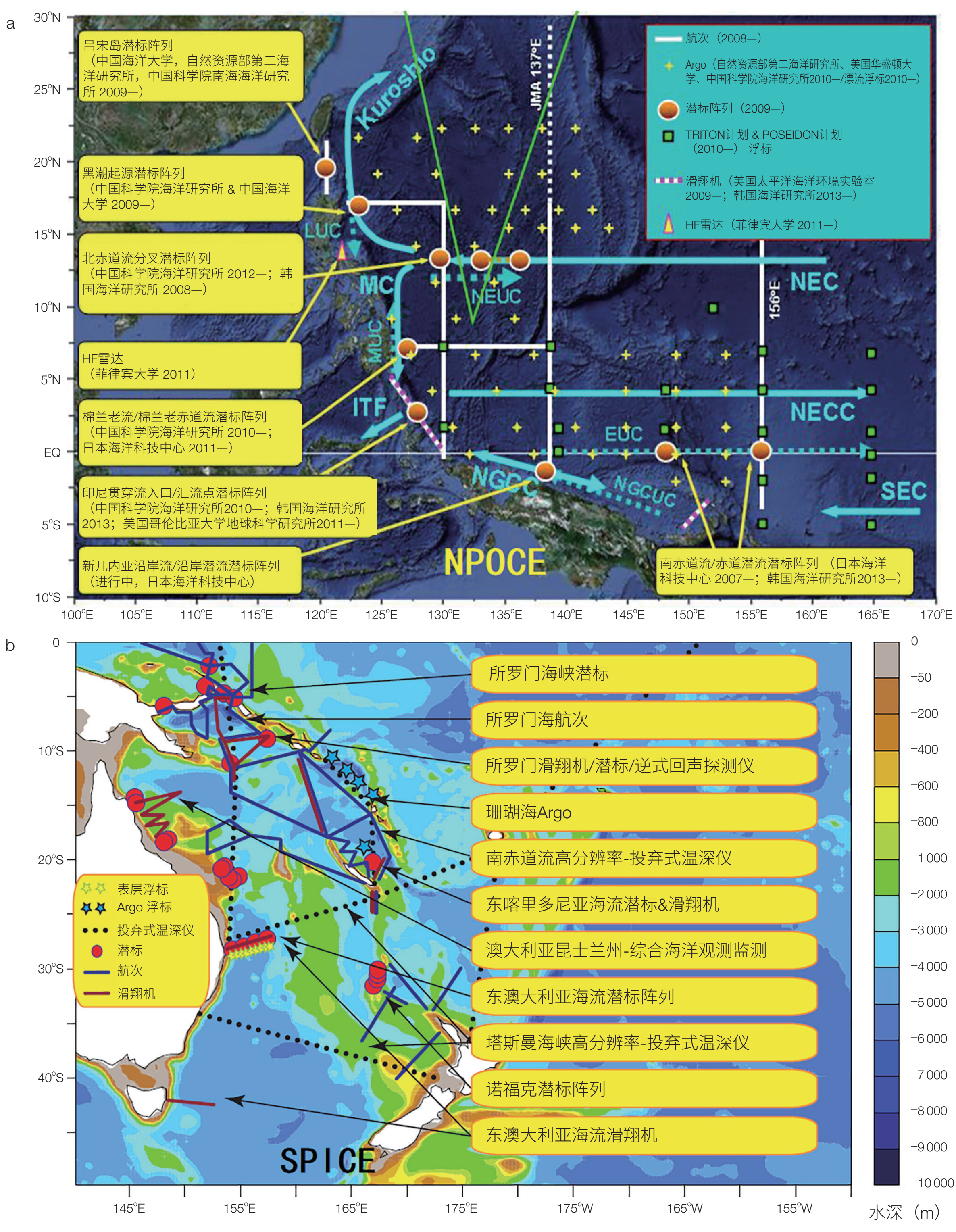


图 7 西北太平洋海洋环流与气候试验（a）[23] 和西南太平洋海洋环流与气候试验（b）[20] 观测站位设计

Figure 7 Map of oceanographic stations of NPOCE (a)[23] and SPICE (b)[20]

TRITON，由日本海洋 - 地球科技研究所维护的 TOGA 计划观测网中的跨洋浮标观测系统；POSEIDON，由韩国发起的一个西北太平洋海洋环境研究及深海与边缘海相互作用

TRITON is part of the TOGA observation network maintained by the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology; POSEIDON refers to the project of Northwestern Pacific Ocean Study on the Environment and Interaction between Deep Ocean and Marginal Seas, which is initiated by Korea scientists

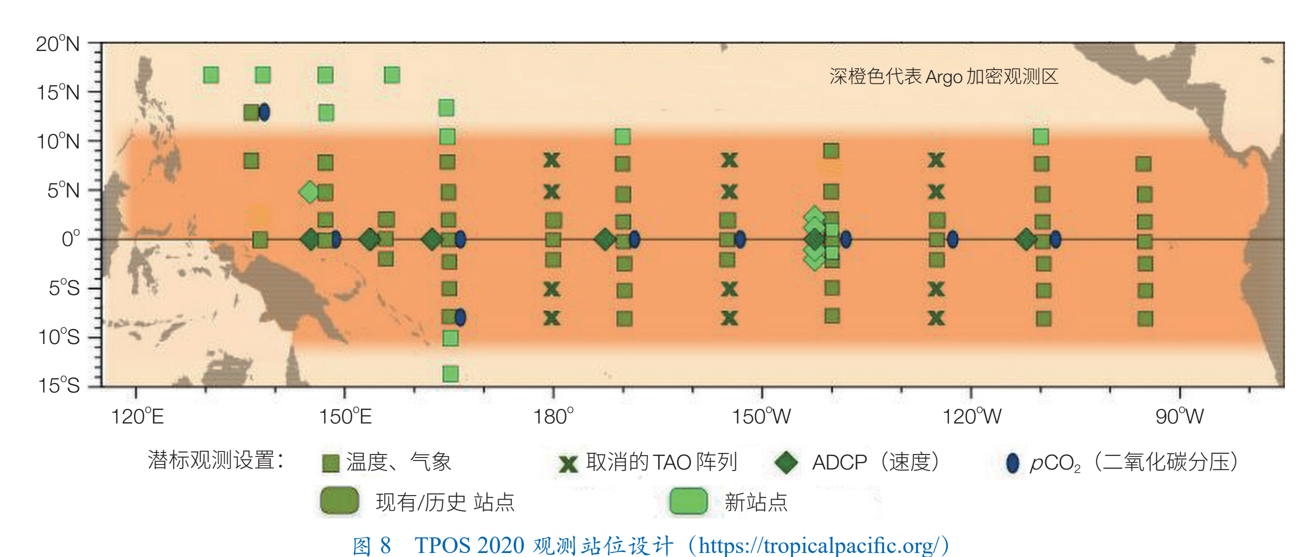


图 8　TPOS 2020 观测站位设计（https://tropicalpacific.org/）

Figure 8　Map of oceanographic stations of TPOS 2020 (from https://tropicalpacific.org/)

高短期气候预测能力具有重要作用。中国自主研发的深海浮标"白龙"成为RAMA观测系统中的重要组成部分。在印太交汇区，IndOOS观测主要集中在东印度洋海域，主要包含两条断面和潜标观测（图9a）；自2020年开始，IndOOS开始实施第二阶段的观测计划，显著增加了印度洋海域的Argo剖面浮标观测数量（图9b）[37]。

2.4 "海洋性大陆观测"

"海洋性大陆观测"（YMC）是一项偏重于大气科学方面的国际计划，开始于2017年，主要针对印太交汇区中的中国南海、中南半岛、菲律宾群岛、印度尼西亚群岛、新几内亚岛等众多岛屿及一系列浅海

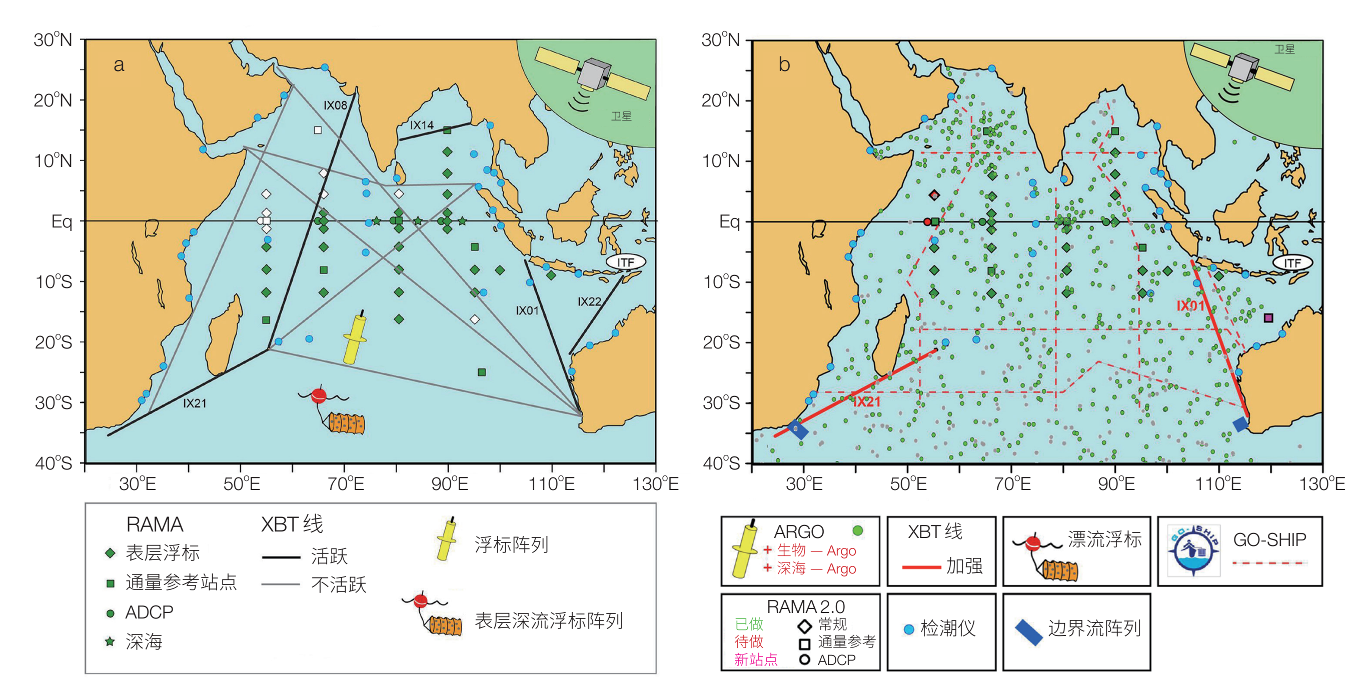


图 9　印度洋海洋观测系统站位原始设计及现状（a）、2020—2030 年规划（b）站位图[37]

Figure 9　Map of oceanographic stations of IndOOS: Stations designed and currently conducted (a), and designed stations for 2020–2030 (b)[37]

组成的海洋性大陆区域开展大规模的定点、走航观测和数值模拟实验（图 10）[38]，增进对海洋性大陆地区的大气对流状况、上层海洋过程和海-气相互作用、平流层和对流层的相互作用、大气气溶胶的认知，改进该区域数值模式，从而提升对该区域天气气候系统多尺度变异及其全球影响的认识和预测[39]。该计划由包括中国、日本、印度尼西亚、英国、澳大利亚在内的 15 个国家参与，分为两个阶段实施，第一阶段已于 2020 年结束。目前，YMC 计划在海洋性大陆区域构建了一个综合的天气、气候观测网络，为下一步开展该区域数值模式与观测集成奠定了良好的基础[38]。

2.5 “印度尼西亚群岛层结与输运”

相比而言，印太交汇区核心海域海洋观测国际计划仍相对较少。在 Arlindo 之后，印尼海实施的规模最大的多边国际合作计划是“印度尼西亚群岛层结与输运”（INSTANT）（图 11）[40]。该计划开始于 2003 年，联合来自印度尼西亚、法国、荷兰、美国和澳大利亚的科学家通过观测 ITF 研究其强度和垂直分布，为海洋环流和气候模式的初始过程和验证提供观测支撑[40]。INSTANT 于 2004—2006 年对 ITF 主要路径开展了同步观测，基本厘清了印尼海中 ITF 各个通道的流量，并揭示了关键海峡通量的季节和季节内变异[41]。

2.6 印太交汇区多圈层国际合作计划

尽管 21 世纪以来，印太交汇区海洋观测国际计划不断增多，但这些计划大多都是围绕单一学科或 2—3 个学科开展，国际合作仍受观测手段和学科壁垒限制。鉴于印太交汇区具有独特的海洋、大气环流交汇，以及欧亚板块、太平洋板块和印澳板块交汇的自然属性，也是全球海洋生物多样性中心，各圈层之间存在非常紧密且复杂的相互作用，割裂地就其中 1—2 个学科开展研究，可能难以得到准确而统一的整体

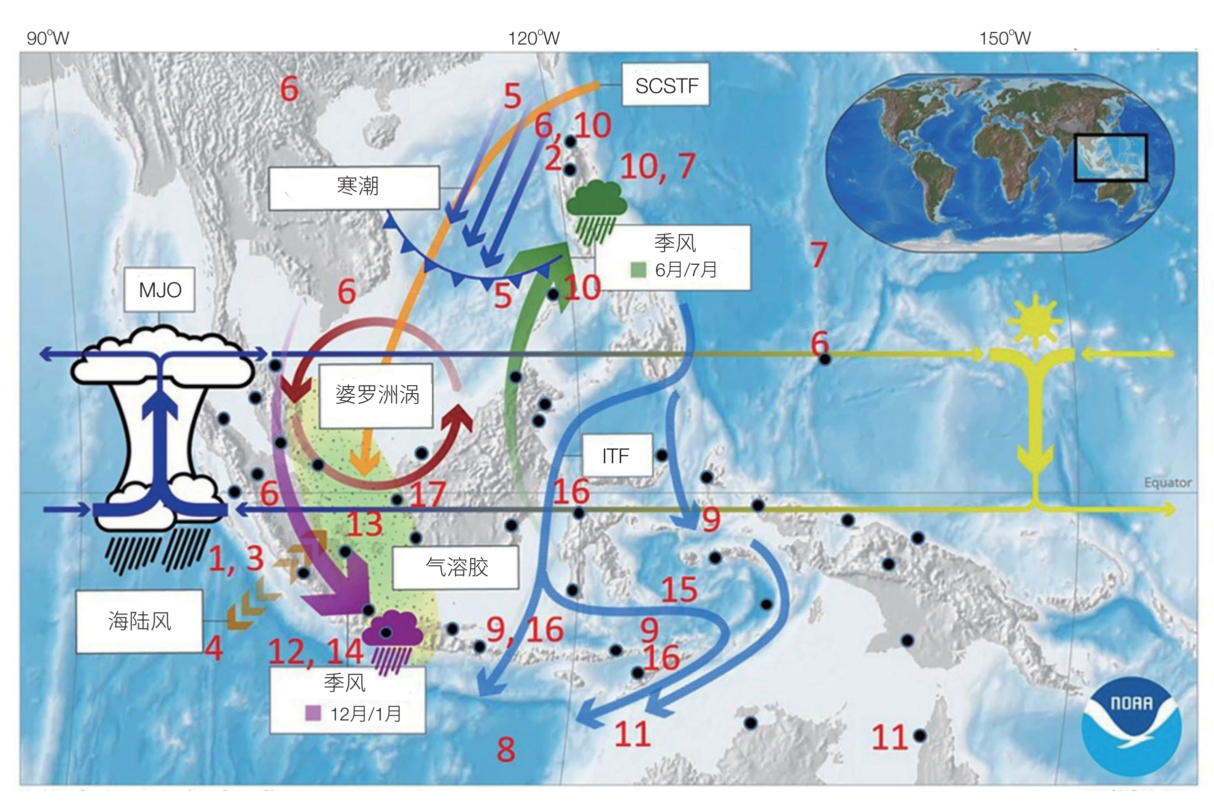


图 10 “海洋性大陆观测”主要观测区域及站位设置[38]

Figure 10 Schematic diagrams of major phenomena and oceanographic stations of YMC[38]

红色数字标记位置是加密观测区域，黑色圆点表示无线电探空站

Numbers mark approximate locations of intensive observations; Dots indicate radiosonde stations

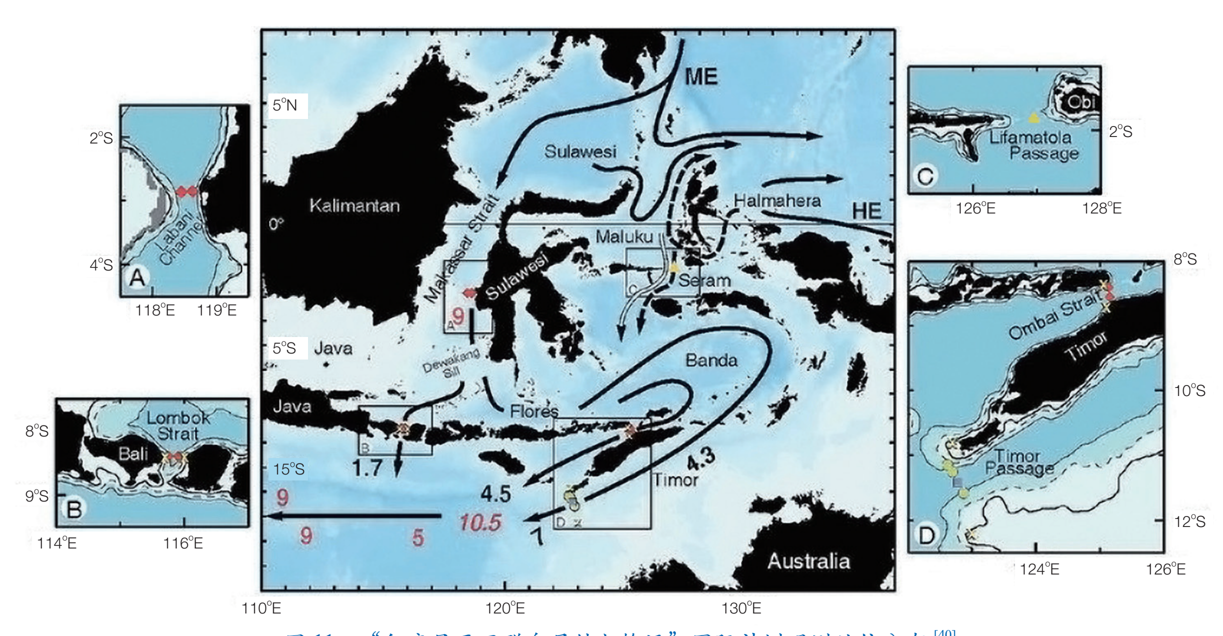


图 11 “印度尼西亚群岛层结与输运”国际计划观测站位分布[40]

Figure 11 Map of oceanographic stations of INSTANT[40]

认知。因此，有必要开展印太交汇区多圈层大型国际合作计划，厘清各圈层相互作用对物质能量在该区域汇聚演化的作用。目前，中国科学院海洋研究所在中国科学院战略性先导科技专项和国家自然科学基金重大项目支持下，正在发起针对印太交汇区多圈层相互作用的“印太交汇区多学科综合调查-生物多样性研究”国际大科学计划，并于2021年纳入UNESCO-IOC框架下。

3 印太交汇区海洋观测国际计划对我国该领域科研成果成效分析

基于Clarivate科学引文索引扩展数据库（SCI-E）检索到的文献信息①，本节详细分析了全球在印太交汇区海洋观测领域的论文发表情况，以及我国在该领域科研成果的变化趋势。总体来说，按照国别划分，1960—2021年印太交汇区海洋观测研究在SCI-E数据库中发文量排在前3位的国家分别是美国（598篇）、中国（203篇）和法国（113篇）（图12a）；美国在该领域的主导地位非常明显，这也跟前面提到的20世纪60年代开始以欧美发达国家主导的全球观测计划实施是一致的。如果从近5年的数据来看，虽然排名前3位的国家没变，但中国与美国的差距明显缩小，从之前仅为美国的1/3增长到2/3（图12b），这显示出近些年我国在印太海洋观测领域的快速发展和取得的显著成效。

为了凸显我国“十二五”以来在印太交汇区海洋观测领域的成果，我们进一步针对2010—2021年期间，各个国家研究机构在印太交汇区海洋观测领域发表论文进行了检索（图13）。结果表明，近10年来中国科学院海洋研究所在印太交汇区海洋观测领域取得了非常卓越的成果，在国际上已经处于该领域的引领地位，其发表的论文成果已经位列全球科研机构排名第一位，追平美国国家海洋和大气管理局；排名第三到第五位的科研机构也都来自中国，分别是中国科

① 使用“海洋”“观测”“印度洋”“西太平洋”“印尼海”和“动力学”的相关英文单词和缩写词作为检索词进行主题检索，检索到的文献类型限定ARTICLE、PROCEEDINGS PAPER和REVIEW，检索日期设定为1960—2021年，共检索得到1021篇文献，并使用Clarivate公司开发的文本挖掘软件Dewent Data Analyzer（DDA）进行文献分析。



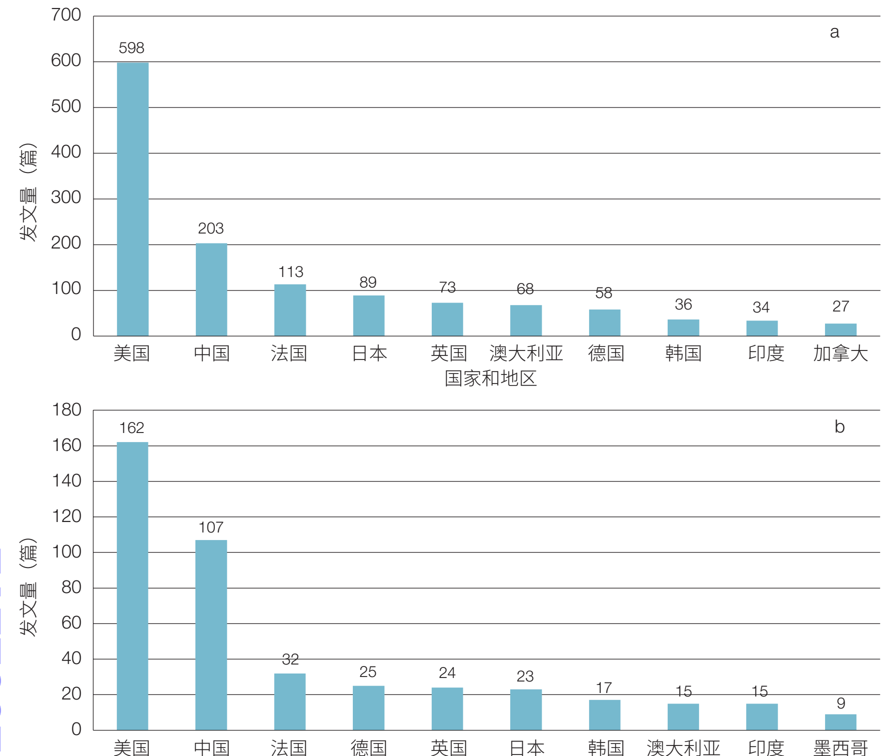


图 12　印太交汇区海洋观测研究各国家或地区发文量对比

Figure 12　Number comparison of global publications regarding ocean observation in the Indo-Pacific convergence region among countries and regions

（a）1960—2021 年；（b）2017—2021 年

(a) 1960–2021; (b) 2017–2021

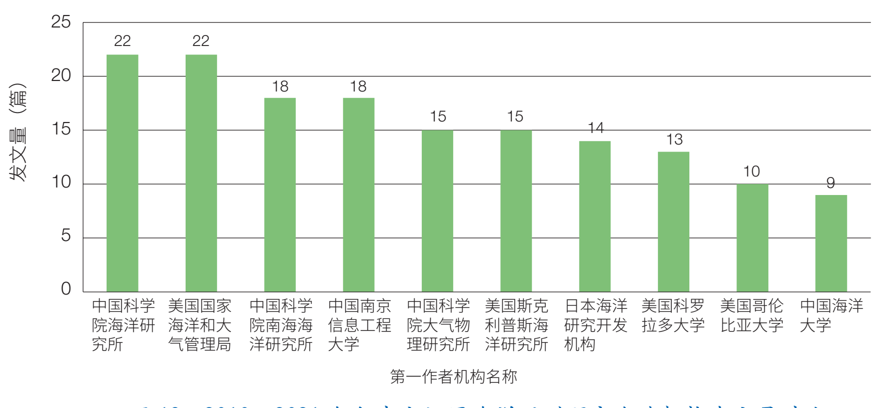


图 13　2010—2021 年印太交汇区海洋观测研究全球机构发文量对比

Figure 13　Number comparison of ocean observation publications by global institutions/universities in Indo-Pacific convergence region during 2010–2021

学院南海海洋研究所、中国南京信息工程大学和中国科学院大气物理研究所，这显示出中国海洋观测科学与技术近些年来在国家战略指引下，取得了长足的发展，已具备较强的国际竞争优势。

上述SCI-E数据库检索文献结果表明，随着“十二五”以来我国在印太交汇区海洋国际观测投入的增加，我国在该领域研究方面取得了很多重要进展，特别是在该区域的海洋环流三维结构及其变异机理、海气相互作用、ENSO多样性及其预测，以及热带气旋模拟等方面取得了很多重要成果，在印太交汇区积累了宝贵的海洋观测数据，为国际海洋科学与气候研究作出了重要贡献。同时，我国海洋观测仪器装备也随着印太交汇区海洋国际观测计划的推进、实施和我国海洋科考调查的发展得到了长足发展，详细成果可参见《中国科学院院刊》2022年第 7 期“海洋观测探测与安全保障技术”专题相关文章。

4 展望与思考

受全球变暖持续影响，各种极端天气事件频发，对包括我国在内的印太交汇区周边国家的经济社会发展和人民生命财产安全都带来了极大威胁。海洋与气候问题逐渐成为各国关注的重要战略问题，科学界开始意识到全球海洋观测系统不仅是用以了解海洋在全球气候中所起作用，还需要对其开展跨学科、多圈层一体化观测和海洋系统科学研究，以支撑经济社会可持续发展的多方面科技需求。印太交汇区作为全球海洋生物多样性最高的区域，具有丰富的红树林、海草床等生态系统，是非常重要的天然碳汇，对减缓温室气体效应具有重要作用。该区域的上层海洋和低层大气能量、物质、热量呈现聚合特征，也是欧亚板块、印度洋板块、太平洋板块碰撞的中心。未来该区域的国际观测计划主要从3个方面进行布局。

（1）从水圈、气圈、岩石圈、生物圈多个圈层之间的联系和相互作用角度开展多圈层协同观测与国际合作，构建跨学科、多圈层的一体式观测研究模式。该区域已有的国际观测计划大多是关注的大气、海洋或生物多样性等单一或某两个圈层的科学问题。未来的国际观测计划应当进一步以国际合作调查研究、能力建设和人才培养为抓手，从系统科学的视角，围绕地球系统多圈层相互作用这一主线，聚焦于海气界面、海陆界面和海底界面物质能量交换过程，开展海洋与气候变化、海洋生态系统健康与生物资源变动、海底岩石圈形成演化与资源环境效应、深海环境与生命过程等综合交叉研究；依托我国自主构建的海洋科学观测体系开展印太交汇区海洋综合观测、模拟和研究平台，全面提升对该海域的探测、预测能力和科学认知水平。

（2）发起中国主导的国际观测计划，开展该区域深海观测研究，助力提升深海动力过程及其气候环境效应认知、发展性能稳定的深海观测装备和数据传输系统。以往观测研究更多聚焦在印太交汇区海洋的上层，对主温跃层以下的中深层海洋观测匮乏。已有研究表明，在全球变暖大背景下越来越多的热量向深海传递，海洋因其巨大的体量发挥着全球变暖的缓冲器作用。深海还存在着丰富的多尺度海洋动力过程，深海地形波动和深海涡旋会引起强烈的深层季节内振荡，通过压力梯度、行星波动和中尺度涡等可以将上层海洋信号快速传递至深海[42-45]。厘清深海动力过程、生物地球化学过程和生物生态过程对气候预报预测、海洋环境安全保障和生物资源保护至关重要。在大西洋，以欧美科学家为主建立了针对全球经向翻转环流上下分支数个观测断面，通过上百套潜标和水下滑翔机群对深层环流、水团等进行长时间观测。然而，在印太交汇区，尚未建立系统而长期的深海观测体系。

（3）聚焦构建可持续的并与全球海洋观测有机结合的印太交汇区国际观测系统。纵观全球海洋观测系统计划实施以来给全球的经济社会发展带来了非常显著的效益：除了增加商业利润，降低商业风险和不确定性外，也显著提升了公共效益，其中最重要的就是自然灾害的预警预报。由于印太交汇区在全球气候变化中扮演着非常重要的角色，也是全球最密集的人口居住地，该区域未来的海洋观测国际计划应聚焦于构建可持续的并与全球海洋观测有机结合的目标。从需求、观测、数据和信息这几个部分出发，去考察海洋变量的作用，这也是目前全球海洋界提倡的一种海洋观测架构系统方法[46]。中国科学院在近10年，通过实施2个战略性先导科技专项，在印太交汇区开展了以海洋观测为基础的多圈层、多学科交叉研究，为我国引领该区域国际海洋观测计划奠定了良好的基础。未来，我国将通过进一步加强与该区域周边国家的科学调查国际合作，构建更加完善的对国计民生产生重要影响的海洋环境监测网络和预测系统。这既对国际地球科学领域作出重要贡献，也是我国实施海洋强国战略、建设“21世纪海上丝绸之路”的重要举措。

参考文献

1 吴国雄, 李建平, 周天军, 等. 影响我国短期气候异常的关键区：亚印太交汇区. 地球科学进展, 2006, 21(11): 1109-1118.

Wu G X, Li J P, Zhou T J, et al. The key region affecting the short-term climate variations in China: The joining area of Asia and Indian-Pacific Ocean. Advances in Earth Science, 2006, 21(11): 1109-1118. (in Chinese)

2 Cane M A. A role for the tropical Pacific. Science, 1998, 282: 59-61.

3 Hu D X, Wu L X, Cai W J, et al. Pacific western boundary currents and their roles in climate. Nature, 2015, 522: 299-308.

4 De Deckker P. The Indo-Pacific Warm Pool: Critical to world oceanography and world climate. Geoscience Letters, 2016, 3: 20.

5 Weller E, Min S K, Cai W J, et al. Human-caused Indo-Pacific warm pool expansion. Science Advances, 2016, 2(7):

e1501719.

6 Williams A P, Funk C. A westward extension of the warm pool leads to a westward extension of the Walker circulation, drying eastern Africa. Climate Dynamics, 2011, 37(11): 2417-2435.

7 Hoyos C D, Webster P J. Evolution and modulation of tropical heating from the last glacial maximum through the twenty-first century. Climate Dynamics, 2012, 38(7): 1501-1519.

8 Rao S A, Dhakate A R, Saha S K, et al. Why is Indian Ocean warming consistently?. Climatic Change, 2012, 110(3): 709-719.

9 Marr J C. Cooperative study of the Kuroshio and adjacent regions. Transactions, American Geophysical Union, 1968, 49(3): 559-560.

10 Ando K, Lin X P, Villanoy C, et al. Half-century of scientific advancements since the cooperative study of the Kuroshio and adjacent regions (CSK) programme - need for a new Kuroshio research. Progress in Oceanography, 2021, 193: 102513.

11 Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. Climate Change: IPCC Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

12 Hu D X, Wang F, Sprintall J, et al. Review on observational studies of western tropical Pacific Ocean circulation and climate. Journal of Oceanology and Limnology, 2020, 38(4): 906-929.

13 Knauss J A. The structure of the Pacific equatorial countercurrent. Journal of Geophysical Research, 1961, 66(1): 143-155.

14 Hood R R, Urban E R, McPhaden M J, et al. The 2nd International Indian Ocean Expedition (IIOE-2): Motivating new exploration in a poorly understood basin. Limnology and Oceanography Bulletin, 2016, 25(4): 117-124.

15 于卫东, 方越, 刘琳, 等. 第二次国际印度洋科学考察计划（IIOE-2）介绍. 海洋科学进展, 2017, 35(1): 1-7.

Yu W D, Fang Y, Liu L, et al. Introduction of the second international Indian Ocean expedition (IIOE-2). Advances in Marine Science, 2017, 35(1): 1-7. (in Chinese)

16 Gordon A L, Fine R A. Pathways of water between the Pacific and Indian oceans in the Indonesian seas. Nature, 1996, 379: 146-149.

17 许建平. 阿尔戈全球海洋观测大探秘. 北京: 海洋出版社, 2002.

Xu J P. Argo Global Ocean Survey. Beijing: Maritime Press, 2002. (in Chinese)

18 Riser S C, Freeland H J, Roemmich D, et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. Nature Climate Change, 2016, 6(2): 145-153.

19 Wei Z X, Li S J, Susanto R D, et al. An overview of 10-year observation of the South China Sea branch of the Pacific to Indian Ocean throughflow at the Karimata Strait. Acta Oceanologica Sinica, 2019, 38(4): 1-11.

20 Ganachaud A, Cravatte S, Melet A, et al. The Southwest Pacific Ocean circulation and climate experiment (SPICE). Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(11): 7660-7686.

21 Ganachaud A, Cravatte S, Sprintall J, et al. The Solomon Sea: Its circulation, chemistry, geochemistry and biology explored during two oceanographic cruises. Elementa: Science of the Anthropocene, 2017, 5: 33.

22 Alberty M, Sprintall J, MacKinnon J, et al. Moored observations of transport in the Solomon Sea. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(11): 8166-8192.

23 Hu D X, Wang F, Wu L, et al. Northwestern Pacific Ocean Circulation and Climate Experiment (NPOCE) Science/Implementation Plan. Beijing: China Ocean Press, 2011.

24 Wang F, Li Y L, Wang J N. Intraseasonal variability of the surface zonal currents in the Western Tropical Pacific Ocean: Characteristics and mechanisms. Journal of Physical Oceanography, 2016, 46(12): 3639-3660.

25 Li X, Yuan D, Li Y, et al. Moored observations of currents and water mass properties between Talaud and Halmahera Islands at the entrance of the Indonesian Seas. Journal of Physical Oceanography, 2021, 51(12): 3557-3572.

26 Chen Z H, Wu L X. Seasonal variation of the Pacific south equatorial current bifurcation. Journal of Physical Oceanography, 2015, 45(6): 1757-1770.

27 Zhang L L, Hu D X, Hu S J, et al. Mindanao Current/undercurrent measured by a subsurface mooring. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(6): 3617-3628.

28 Hu S J, Hu D X, Guan C, et al. Interannual variability of the Mindanao Current/Undercurrent in direct observations and numerical simulations. Journal of Physical Oceanography, 2016, 46(2): 483-499.

29 王凡, 汪嘉宁, 张林林, 等. 主流系与西太平洋暖池变异机制研究进展. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1145-1155.
Wang F, Wang J N, Zhang L L, et al. Research progresses in the variability of western Pacific main current system and warm pool. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(6): 1145-1155. (in Chinese)

30 袁东亮, 周慧, 王铮, 等. 印尼贯穿流源区环流的多尺度变异及其科学重要性. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1156-1168.
Yuan D L, Zhou H, Wang Z, et al. The multi-scale variability of the oceancirculation at the Pacific entrance of the Indonesian throughflow and its scientific importance. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2017, 48(6): 1156-1168. (in Chinese)

31 Hu S J, Sprintall J, Guan C, et al. Spatiotemporal features of intraseasonal oceanic variability in the Philippine Sea from mooring observations and numerical simulations. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2018, 123(7): 4874-4887.

32 Wang J N, Ma Q, Wang F, et al. Seasonal variation of the deep limb of the Pacific Meridional Overturning Circulation at Yap-Mariana Junction. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2020, 125(7): e2019JC016017.

33 Li X, Yuan D L, Wang Z, et al. Moored observations of transport and variability of Halmahera Sea currents. Journal of Physical Oceanography, 2020, 50(2): 471-488.

34 Zhou H, Liu X Q, Li R X, et al. Intraseasonal variability of the north equatorial current bifurcation off the Philippines. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2021, 126(11): e2021JC017646.

35 Zhou H, Dewar W, Yang W L, et al. Observations and modeling of symmetric instability in the ocean interior in the Northwestern Equatorial Pacific. Communications Earth & Environment, 2022, 3: 28.

36 Liu C Y, Huo D, Liu Z Y, et al. Turbulent mixing in the barrier layer of the equatorial Pacific Ocean. Geophysical Research Letters, 2022, 49(5): e2021GL097690.

37 Hermes J C, Masumoto Y, Beal L M, et al. A sustained ocean observing system in the Indian Ocean for climate related scientific knowledge and societal needs. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 355.

38 Yoneyama K, Zhang C. Years of the maritime continent. Geophysical Research Letters, 2020, 47(12): e2020GL087182.

39 王鑫, 王东晓, Chidong Zhang, 等. “海洋性大陆”观测研究计划介绍及中国参与进展. 气象学报, 2016, 74(4): 653-654.
Wang X, Wang D X, Zhang C D, et al. Introduction of “Ocean Continent” observation research program and progress of China’s participation. Acta Meteorologica Sinica, 2016, 74(4): 653-654. (in Chinese)

40 Sprintall J, Wijffels S, Gordon A L, et al. INSTANT: A new international array to measure the Indonesian Throughflow. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2004, 85(39): 369-376.

41 Gordon A L, Sprintall J, van Aken H M, et al. The Indonesian throughflow during 2004-2006 as observed by the INSTANT program. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2010, 50(2): 115-128.

42 Ma Q, Wang F, Wang J N, et al. Intensified deep ocean variability induced by topographic Rossby waves at the Pacific Yap-Mariana Junction. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(11): 8360-8374.

43 Wang J N, Ma Q, Wang F, et al. Linking seasonal-to-interannual variability of intermediate currents in the southwest tropical Pacific to wind forcing and ENSO. Geophysical Research Letters, 2021, 48(5): e2020GL092440.

44 Wang J N, Wang F, Lu Y Y, et al. Pathways, volume transport, and seasonal variability of the lower deep limb of the Pacific meridional overturning circulation at the Yap-Mariana junction. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 672199.

45 Wang F, Wang J N, Xu L J, et al. The development of a new real-time subsurface mooring. Journal of Oceanology and Limnology, 2020, 38(4): 1080-1091.

46 Moltmann T, Turton J, Zhang H M, et al. A global ocean observing system (GOOS), delivered through enhanced collaboration across regions, communities, and new technologies. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 291.

Review and Prospect on International Ocean Circulation and Climate Observation Projects in Indo-Pacific Convergence Region

WANG Fan[1,2*]　ZHOU Hui[1,2]　WANG Jianing[1,2]　WANG Lin[1]　MA Yixin[1]

（1 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2 College of Marine Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract　Today, human society faces global warming and its subsequent challenges. The ocean, as one important supporting component of the earth's life system, plays a vital role in realizing the goal of sustainable development of human society. As the birthplace of the heat engine of the earth's climate system, the Indo-Pacific convergence region plays a decisive role in modulating the distribution of earth heat and climate change and has been the focus of international ocean and climate observation projects. This study aims to summarize the achievements and challenges in the international observation projects in the Indo-Pacific convergence region since the last century. Through a detailed literature investigation, the achievements and substantial progress achieved in the Indo-Pacific convergence region international ocean circulation and climate projects are further quantified under the strategy of Marine Power of China since the "12th Five-Year Plan", including the leadership of China in this area and solid scientific research output. Based on the recent 10-year experience in international cooperation and field expeditions in the Indo-Pacific convergence region, we propose a framework for future international cooperation through enhancing multi-sphere and multi-disciplinary investigations, which can well support sustainable global development, tackle the climate change, and highlight the top-level design and leadership of China in fulfilling the goal.

Keywords　Indo-Pacific convergence region, ocean observation, international project, global warming, multi-sphere synchronized observation system, deep-ocean investigation, multi-dispensary cooperation



王　凡　中国科学院海洋研究所所长、研究员。中国海洋湖沼学会常务副理事长、西北太平洋海洋环流与气候试验（NPOCE）科学指导委员会主席。长期开展印太交汇区海洋环流与暖池动力学研究。先后主持"973"、国家重点研发计划、国家自然科学基金重点基金和重大基金、中国科学院战略性先导科技专项等重大项目。针对热带西太平洋环流与暖池的次表层结构与变异、中深层环流变异等前沿科学问题开展了长期系统研究，取得了重要的科学发现和理论创新，实现深海潜标连续实时观测重大突破，积极开拓"人工智能海洋学"等前沿交叉研究领域。在*Nature*、*National Science Review*、*Science Advances*等发表论文160余篇；荣获全国优秀科技工作者、中国科学院杰出科技成就奖、山东省自然科学奖一等奖、"海洋工程科技奖一等奖"等。

E-mail: fwang@qdio.ac.cn

WANG Fan　Ph.D., Professor, Director of the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (CAS); Vice Chairman, Chinese Society for Oceanology and Limnology; and Chairman, Northwestern Pacific Ocean Circulation and Climate Experiment (NPOCE). Prof. Wang has led National Program on Key Basic Research Project (973 Program), the National Key Research and Development Program, Major and Key Programs of the National Natural Science Foundation of China, the Strategic Priority Research Program of CAS, etc. He carries out research on multi-scale dynamical processes in the Indo-Pacific convergence area and surrounding regions, and has achieved important scientific discoveries and theory innovations in the three-dimensional circulations in the western Pacific and the subsurface structure and variabilities in the warm pool. He realized the breakthrough in the real-time transmission of the deep ocean data, and advocated the "artificial intelligence oceanography". Prof. Wang has published more than 160 scientific papers in journals such as *Nature*, *National Science Review*, and *Science Advances*. He was awarded Outstanding Achievement Prize in Science and Technology of CAS, the first prize of Natural Science of Shandong Province, the first prize of Oceanographic Engineering Science and Technology Award, etc. He was also awarded National Excellent Scientific and Technological Worker. E-mail: fwang@qdio.ac.cn

■责任编辑：岳凌生

*Corresponding author